



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Civil

“Hormigones alternativos de alto desempeño con el uso de desechos de porcelana como agregado grueso”

Proyecto de titulación previo
a la obtención del grado de
Ingeniero Civil

Autor:
Christopher Fabiany Tapia Argudo
C.I 0302006986

Director:
Ing. Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco
C.I 0301500476

Cuenca – Ecuador

2018



Resumen

El sector de la construcción genera el 25% de todos los desechos y emite el 40-50% de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Este proyecto determinó si es posible reciclar 11 toneladas diarias de porcelana desechada por Graiman, reemplazando el agregado grueso mineral por la incorporación parcial o total de porcelana reciclada triturada en las mezclas de hormigón. Esta factibilidad de reemplazo se estimó primeramente por medio de la caracterización de los agregados mineral y reciclado, seguido a esto se diseñó una mezcla de hormigón de alto desempeño patrón, para en base a este ir realizando combinaciones entre agregados mineral y reciclado, para finalmente estableciendo un porcentaje óptimo de combinación verificar el comportamiento del agregado reciclado en la mezcla de hormigón, por medio de ensayos a compresión y tracción indirecta. Los resultados muestran mediante los ensayos una combinación de agregados óptima 70% grava – 30% porcelana; pero también muestra que con 100% porcelana el hormigón no deja de ser de alto desempeño, por lo que el 100% de reemplazo también se aprueba para la elaboración de hormigón de alto desempeño, mostrando una resistencia mayor a 21MPa para edificación y 3.5 MPa en infraestructura vial; y aporta hasta un 70% en la calificación necesaria para una certificación medioambiental y reduce hasta 613.3 Gigajoules (GJ) en consumo de energía y 108,704 kg CO₂e de emisiones, en su mezcla con combinación de agregados óptima con respecto al consumo realizado por Hormicroto en el 2014.

Palabras Claves: HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES, RECICLAR, PORCELANA, SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL.



Abstract

The construction sector generates 25% of all waste and emits 40-50% of greenhouse gases worldwide. This project determined if it is possible to recycle 11 tons per day of porcelain discarded by Graiman, replacing the coarse mineral aggregate by the partial or total incorporation of recycled porcelain crushed in the concrete mixtures. This substitution feasibility was first estimated through the characterization of the mineral and recycled aggregates, followed by the design of a high-performance concrete mixture, based on this, making combinations between mineral and recycled aggregates, finally establishing an optimum percentage of combination verify the behavior of the recycled aggregate in the concrete mix, by means of compression tests and indirect traction. The results show through the tests a combination of optimal aggregates 70% gravel - 30% porcelain; but it also shows that with 100% porcelain the concrete does not stop being of high performance, so that 100% of replacement is also approved for the elaboration of high performance concrete, showing a resistance greater than 21MPa for building and 3.5 MPa in road infrastructure; and contributes up to 70% in the qualification needed for an environmental certification and reduces up to 613.3 Gigajoules (GJ) in energy consumption and 108,704 kg CO₂e emissions, in its mixture with optimal combination of aggregates with respect to the consumption made by Hormicreto in the 2014.

Keywords: HIGH PERFORMANCE CONCRETE, RECYCLE, PORCELAIN, ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY.



ÍNDICE GENERAL

LINEAMIENTOS.....	10
1.1. PROBLEMA	10
1.2. ALCANCE.....	11
1.3. JUSTIFICACIÓN	11
1.4. OBJETIVO	12
1.4.1. Objetivo General.....	12
1.4.2. Objetivos específicos	12
MATERIALES Y MÉTODOS	13
2.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO MINERAL Y RECICLADO	13
2.1.1 Granulometría	13
2.1.2 Densidad relativa y absorción	15
2.1.3 Masa Unitaria	18
2.2 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS.....	19
2.2.1 Diseño de mezclas	19
2.2.2 Elaboración de mezclas.....	23
2.3 PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO.....	26
2.3.1 Ensayo de resistencia a la compresión.....	26
2.3.2 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta	27
2.4 SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL	28
2.4.1 LEED	29
2.4.2 Greenroads.....	31
2.4.3 PaLATE V2.2.....	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO MINERAL Y RECICLADO	33
3.1.1. Granulometría	33
3.1.2. Densidad relativa y absorción	36
3.1.3. Masa unitaria.....	37
3.2. DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS.....	38
3.2.1. Diseño de mezclas	38
3.2.2. Elaboración de mezclas.....	40
3.3. PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO.....	42
3.3.1. Ensayos de resistencia a la compresión.....	42
3.3.2. Ensayo de resistencia a la tracción	43
3.4. SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL	44



3.4.1. LEED V4.....	44
3.4.2. Greenroads.....	45
3.4.3. PaLATE V2.2.....	46
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
REFERENCIAS.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Selección de asentamiento.....	21
Tabla 2 Porcentaje promedio de airea atrapado.....	21
Tabla 3 Contenido de agua por metro cúbico de hormigón	22
Tabla 4 Relación agua/cemento para resistencia media a la compresión.....	22
Tabla 5 Volumen de grava por metro cúbico de hormigón.....	23
Tabla 6 Categorías del checklist Greenroads	31
Tabla 7 Granulometría agregado grueso mineral	34
Tabla 8 Granulometría agregado fino mineral	35
Tabla 9 Granulometría agregado grueso reciclado	36
Tabla 10 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso mineral	36
Tabla 11 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino mineral	36
Tabla 12 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso reciclado	37
Tabla 13 Diseño mezcla hormigón patrón 100%G.....	38
Tabla 14 Diseño mezcla de hormigón 70%G - 30%P	39
Tabla 15 Diseño mezcla de hormigón 50%G - 50%P	39
Tabla 16 Diseño mezcla de hormigón 30%G - 70%P	39
Tabla 17 Diseño mezcla de hormigón 100%P	40
Tabla 18 Análisis físico - químico y bacteriológico de agua Fuente: (Vélez Guayasamín, 2013), (INEN, 2011a).....	41
Tabla 19 Requisitos físicos del cemento Holcim HE Fuente: (Holcim Ecuador S.A., 2015)	42
Tabla 20 Resultados ensayos resistencia a compresión.....	42
Tabla 21 Resultados ensayos a tracción indirecta.....	44
Tabla 22 Checklist LEED V4.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS



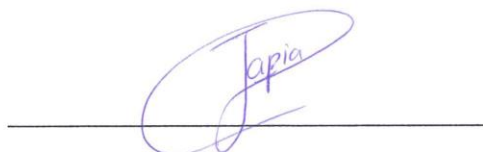
Figura 1 Serie de tamices agregado grueso	13
Figura 2 Serie de tamices agregado fino	14
Figura 3 Trituradora de mandíbulas	15
Figura 4 Proceso diseño de mezclas ACI 211.1.....	20
Figura 5 Elaboración de mezclas de hormigón	24
Figura 6 Curado en sumersión en agua de cilindros de hormigón	26
Figura 7 Ensayos de resistencia a compresión.....	26
Figura 8 Ensayo de tracción indirecta.....	27
Figura 9 Proceso de certificación LEED	30
Figura 10 Curva granulométrica agregado grueso mineral	33
Figura 11 Curva granulométrica agregado fino.....	34
Figura 12 Curva granulométrica agregado grueso reciclado	35
Figura 13 Combinación de agregados mineral - reciclado	37
Figura 14 Curva resistencia a compresión vs tiempo	43
Figura 15 Checklist on line Greenroads.....	45
Figura 16 Mezcla patrón para la producción del 2014 de Hormicreto.....	46
Figura 17 Resultados del análisis medioambiental de la mezcla patrón	46
Figura 18 Mezcla 70%G-30%P para la producción del 2014 de Hormicreto	46
Figura 19 Resultados del análisis medioambiental de la mezcla 70%G-30%P.....	47
Figura 20 Mezcla 100%P para la producción del 2014 de Hormicreto	47
Figura 21 Resultados del análisis medioambiental de la mezcla 100%P.....	47

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Christopher Fabiany Tapia Argudo en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "HORMIGONES ALTERNATIVOS DE ALTO DESEMPEÑO CON EL USO DE DESECHOS DE PORCELANA COMO AGREGADO GRUESO", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 10 de octubre 2018



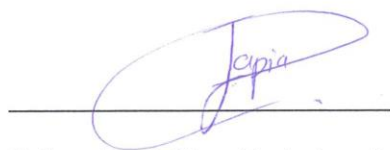
Christopher Fabiany Tapia Argudo

C.I: 0302006986

Cláusula de Propiedad Intelectual

Christopher Fabiany Tapia Argudo, autor del trabajo de titulación "HORMIGONES ALTERNATIVOS DE ALTO DESEMPEÑO CON EL USO DE DESECHOS DE PORCELANA COMO AGREGADO GRUESO", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 10 de octubre 2018



Christopher Fabiany Tapia Argudo

C.I: 0302006986



Universidad de Cuenca

DEDICATORIA

A mi papi, mami y hermanas,

Por motivarme a nunca rendirme y luchar por lo que deseo. Además, por todo el tiempo, paciencia y amor invertido por ellos para recorrer este difícil camino siempre a mi lado, hasta convertirme en Ingeniero.

Christopher Tapia Argudo



LINEAMIENTOS

1.1. PROBLEMA

A nivel mundial la gestión de los desechos se ha convertido en una obligación, cada vez más información y más respeto por nuestro planeta ha forzado a todas las profesiones a buscar soluciones para los desechos que cada uno de ellos generan en el desarrollo de su actividad, y una de las más significativas mundialmente es la de los desechos generados en la industria de construcción. Para tener una idea más clara, a nivel mundial el sector de la construcción consume el 40% de los recursos naturales extraídos, el 40% de la energía primaria total, el 15% del agua dulce, además genera el 25% de todos los desechos y emite el 40-50% de gases de efecto invernadero (Ding & Forsythe, 2013). Es por eso, que acciones encaminadas al aprovechamiento de residuos o desechos son muy valorados en la actualidad.

Ligado al mismo tema, se tiene que la producción de hormigón, produciéndose un aproximado de 2-3 toneladas/persona/año en países desarrollados (Caram, 2012). Y para la elaboración del mismo se usan agregados, y solo en el Ecuador en el año 2016 se ha explotado 3.240.220,85 m³ de materiales de construcción, por lo que no solo la producción de hormigón eleva las emisiones de CO₂, el consumo de combustibles fósiles y de energía, sino también la extracción de agregados (U.S. Green Building Council, 2018).

Por lo tanto, propiciar una perspectiva sostenible que encamine a una cultura del uso racional de materiales naturales y a la reutilización de los recursos, darán como resultado reducción del consumo de energía, reducción del maltrato a la naturaleza en la extracción de agregados y reducción de la contaminación por desechos inorgánicos (Ramírez, 2002).

Con este problema anteriormente definido, para disminuir el uso y explotación de agregado mineral en la elaboración de hormigón, en su reemplazo se buscó en la zona un material no biodegradable y potencial contaminante, encontrando que el austro del Ecuador es la zona más productora de cerámica del país. En Cuenca, según la Cámara de Industrias se fabrica un alrededor de 2.400.000 m² mensualmente, entre recubrimientos de paredes, pisos, además de vajillas,



sanitarios y porcelanas. Como cualquier industria, ésta genera residuos aun antes de salir a la venta ya sea por fallos, trizaduras o roturas en sus productos. Parte de estos residuos son generados por la empresa Graiman específicamente, la cual produce 11 toneladas por día de desechos de porcelana (GRAIMAN, 2017). Porcentaje de estos desechos de la industria Graiman serán triturados y usados como reemplazo del agregado grueso mineral en la mezcla de hormigón en la presente investigación.

1.2. ALCANCE

La investigación está compuesta de cuatro etapas, en la primera se determina las propiedades del agregado mineral y del proveniente de los residuos de la planta central de Graiman para la elaboración del hormigón alternativo, el cual es triturado y luego tamizado para usar solo el material de 3/8".

En la segunda y tercera etapa se realiza los ensayos al hormigón patrón y alternativo en estado fresco y endurecido, para comparar características provenientes de ambos. Los ensayos a los agregados y al hormigón se realizan en cumplimiento de las normas del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), American Concrete Institute (ACI) y American Society for Testing and Materials (ASTM).

Finalmente, en la cuarta etapa se determinará la factibilidad del uso de este nuevo hormigón y los beneficios medioambientales que el mismo propicia al planeta como ahorro energético y emisiones de gases contaminantes. Este análisis del impacto ambiental se lo realizará mediante herramientas medio-ambientales, como por ejemplo una de calificación llamada LEED V4 y otra herramienta calculadora llamada PaLATE, o herramientas alternativas que mejor se ajusten a las necesidades.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación propone primeramente a las industrias cerámicas una utilidad para sus desechos, brindándoles un plus debido a que la sociedad en la época actual valora actos de cuidado medioambiental de las empresas, y segundo brinda una opción de hormigón al sector de la construcción o empresas de prefabricados que opten por brindar elementos estructurales que no solo cumplan



su objetivo en la infraestructura, sino que además cuiden nuestro planeta y sirvan para alcanzar puntos extras para que la nueva estructura pueda postularse para una certificación medioambiental.

El hormigón alternativo de altas prestaciones a desarrollarse no solo se plantea que presente características mecánicas similares o mejores a los del hormigón convencional patrón, sino que además cuente con la ventaja de ser más sostenible medioambientalmente. Y la aprobación de este hormigón para su uso en la construcción, dependerá directamente de la resistencia a compresión y tracción que alcance en relación con el hormigón convencional patrón, de la sostenibilidad del mismo, etc.

1.4. OBJETIVO

1.4.1. Objetivo General

Determinar la factibilidad y sostenibilidad del uso de desechos de porcelana para la elaboración de hormigones alternativos de altas prestaciones.

1.4.2. Objetivos específicos

- Evaluar las características físicas del agregado mineral y del agregado proveniente de los desechos de porcelana que produce la empresa Graiman.
- Diseñar y elaborar mezclas de hormigones de altas prestaciones usando agregado grueso mineral (TMN=3/8") y usando desechos de porcelana triturados (TMN=3/8"), reemplazando diferentes porcentajes del agregado mineral. (TMN: Tamaño Máximo Nominal)
- Determinar la capacidad a compresión y tracción, de los cilindros de hormigones de alta prestaciones con agregado mineral y desechos de porcelana.
- Estimar el beneficio medioambiental, como reducción de: emisiones de CO, CO₂, NO_x, SO₂, PM₃₀ y del consumo de energía, entre otras; por el uso de desechos de porcelana en la elaboración de hormigón en el área de la construcción, con el empleo de la herramienta PaLATE o similares.



- Estimar el beneficio por el uso de desechos de porcelana en la elaboración de hormigón, para obtener una certificación o calificación sostenible con el uso de la herramienta LEED v4 o similares.

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO MINERAL Y RECICLADO

2.1.1 Granulometría

La granulometría es la composición de diversos tamaños de agregado en una muestra (Niño Hernandez, 2010). Para la elaboración de este ensayo con el agregado grueso se preparó una muestra de 5 kg, y se realizó el cribado por medio de los tamices $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", N° 4, N° 8. El pasante se tamizo por él N°16. El tiempo que se tamizo fue de 5 minutos (Astm, 2004).



Figura 1 Serie de tamices agregado grueso

Para el agregado fino, se tomó una muestra de 350 gr secos y se realizó la granulometría por los tamices, N° 4, N° 8, N° 10, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y N° 200 (Astm, 2004).



Figura 2 Serie de tamices agregado fino

Para realizar este ensayo con el agregado reciclado, primeramente, se retiró una cantidad de desechos de porcelana producidos en planta de producción Graiman del día 8 de diciembre de 2017. Esta muestra fue recogida indistintamente, es decir sin seleccionar ya sea unas planchas de porcelana con superficies lisas o ásperas. Para luego se transportadas al laboratorio de la Universidad de Cuenca. Seguido a esto para proceder al triturado, primeramente, para introducir en la trituradora, a la plancha de porcelana se le dio un golpe con martillo para preferiblemente dividirla en cuatro partes e introducirla con facilidad en la trituradora.

El material una vez triturado se esperaba que cuente con características de tamaño similares al del agregado mineral, pero por inspección visual se pudo verificar que también se producen porcentajes de material fino y un poco que no se llega a triturar por completo, por lo que para realizar la granulometría se desechó el material pasante al tamiz N°8. Al realizar el cribado se seleccionó el tamaño útil de agregado reciclado para realizar el reemplazo del agregado mineral.



Figura 3 Trituradora de mandíbulas

2.1.2 Densidad relativa y absorción

Se define a la densidad relativa como la relación entre la densidad del material y la densidad del agua destilada. Para la elaboración de concreto se debe determinar la densidad de manera precisa, puesto que existen cavidades, poros vacíos, poros parcialmente saturados o llenos de agua. Aquí podemos diferenciar dos tipos de poros, los saturables, que están en el exterior y los no saturables, que se encuentran en el interior de la partícula (Niño Hernandez, 2010).

Para el diseño de la mezcla de concreto un parámetro importante es la densidad aparente, ya que con ella se establece la cantidad de agregado requerido en el metro cubico de concreto, debido a que los poros interiores del agregado ocupan un volumen en la mezcla de concreto y porque los poros exteriores con agua no hacen parte del agua requerida para la hidratación del cemento.

Para realizar este ensayo en el agregado mineral y reciclado primeramente se aseguró contar solo con material grueso por lo que se tomó una muestra de 2 kg del material tamizado anteriormente (A). Luego se sumergió la muestra en agua por 24 horas, y después removió la capa de agua de superficial del agregado y obtuvo su peso (B). Seguido a esto se colocó en una canastilla y se sumergió la muestra por completo en el estanque de agua y se determinó su peso (C). La constante de 997.5 hace referencia a la densidad del agua a 23°C (INEN, 2010b).

- **Densidad relativa árido seco al horno (Densidad relativa SH)**



$$\text{Densidad relativa SH} = \frac{A}{B - C}$$

- **Densidad relativa saturado superficialmente seco (Densidad SSS)**

$$\text{Densidad relativa SSS} = \frac{B}{B - C}$$

- **Densidad relativa aparente**

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{A - C}$$

- **Densidad árida seco al horno (Densidad SH):** es la relación entre la masa de las partículas secas al horno y su volumen, incluyendo el volumen poros saturables y no saturables, pero excluyendo los vacíos entre partículas.

$$\text{Densidad SH} \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \frac{997.5 \cdot A}{B - C}$$

- **Densidad árido saturado superficialmente seco (Densidad SSS):** es la relación entre la masa de las partículas en condición SSS y el volumen que ocupa ese material incluyendo volumen de poros no saturables y saturables llenos de agua, sin incluir el vacío entre partículas.

$$\text{Densidad SSS} \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \frac{997.5 \cdot B}{B - C}$$

- **Densidad aparente:** o también conocida como masa unitaria, es la relación entre la masa de las partículas y el volumen que ocupa ese material incluyendo volumen de poros no saturables y saturables.

$$\text{Densidad aparente} \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \frac{997.5 \cdot A}{A - C}$$

A = masa en aire de la muestra seca [gr]

Donde: B = masa en aire la muestra saturada superficialmente seca [gr]

C = masa aparente en agua de la muestra saturada [gr]

La capacidad de absorción se puede determinar mediante la diferencia de pesos saturados y SSS.

Esta característica nos es sumamente útil por dos motivos:

- Permite establecer una cualidad del material, ya que cuanto menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad.



- En la etapa de elaboración de la mezcla de concreto, nos permite conocer las condiciones reales de los materiales y realizar las correcciones necesarias en la cantidad de agua a añadir.

$$\% \text{ Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100$$

Para establecer la densidad y absorción del agregado fino, se realizó por medio del procedimiento volumétrico, para el cual primeramente se satura la muestra por 24 horas, luego se sometió a un secado para establecer las condiciones SSS del agregado, las cuales se comprobó por medio de un cono truncado llenándolo por medio de tres capas compactadas con 25 golpes. Se retiró el cono truncado y se realizó este paso hasta que el material presente forma de cono. Luego, se introdujo en el matraz 55±5 gr de árido fino en condiciones SSS. Después se colocó el tapón en el frasco y se lo hizo girar en círculos horizontales suavemente, hasta que se provocó que aproximadamente todo el aire incorporado sea expulsado y finalmente se pesó el frasco con su contenido (INEN, 2010a).

- **Densidad relativa árido seco al horno (Densidad relativa SH)**

$$\text{Densidad relativa SH} = \frac{S1 * \left(\frac{A}{S}\right)}{0.9975(R2 - R1)}$$

- **Densidad relativa saturado superficialmente seco (Densidad SSS)**

$$\text{Densidad relativa SSS} = \frac{S1}{0.9975 * (R2 - R1)}$$

- **Densidad relativa aparente**

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{S1 * \left(\frac{A}{S}\right)}{0.9975 * (R2 - R1) - \left[\left(\frac{S1}{S}\right)(S - A)\right]}$$

- **Densidad árido seco al horno (Densidad SH):**

$$\text{Densidad (SH)} \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \frac{997.5 * S1 * \left(\frac{A}{S}\right)}{0.9975(R2 - R1)}$$

- **Densidad árido saturado superficialmente seco (Densidad SSS):**

$$\text{Densidad (SSS)} \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \frac{997.5 * S1}{0.9975 * (R2 - R1)}$$



- **Densidad aparente:**

$$\text{Densidad aparente (SSS)} \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \frac{997.5 \cdot S1 \cdot \left(\frac{A}{S} \right)}{0.9975 \cdot (R2 - R1) - \left[\left(\frac{S1}{S} \right) (S - A) \right]}$$

- **Absorción:**

$$\% \text{ Absorción} = \frac{S - A}{A} \cdot 100$$

Donde:

- A = masa en aire de la muestra seca al horno (gr)
- R1= lectura inicial del nivel de agua (cm³)
- R2= lectura final del nivel de agua (cm³)
- S= masa para la absorción (gr)
- S1= masa inicial (gr)

2.1.3 Masa Unitaria

La relación entre la masa que cabe en un recipiente y el volumen del mismo es conocido como masa unitaria, y se le da el nombre de compacta cuando al agregado se lo coloca en capas apisonadas con una varilla metálica (Niño Hernández, 2010).

Para poder realizar este ensayo primeramente se llenó el recipiente con agua, se determinó la masa, y se dividió para la densidad conocida del agua, para así establecer el volumen del recipiente. Luego, se varilló con una varilla de 16 mm la capa de agregado con 25 golpes uniformemente sobre la superficie. El procedimiento fue el mismo para las 3 capas, hasta que se llenó el molde y luego enrasó con la misma varilla con la que se apisonaba. Al varillar la primera capa no se debe permitir que la varilla toque con fuerza el fondo y para la segunda y tercera capa se debe varillar fuerte, pero sin penetrar en la capa anterior. Una vez enrasado se obtuvo el peso lleno y el peso del molde. Una vez determinado la masa de árido, se dividió para el volumen del recipiente. (INEN, 2010c)



Para la investigación también se realizó una forma alternativa de este ensayo, puesto que se necesitaba encontrar la óptima combinación entre el agregado mineral y el agregado reciclado para la elaboración del hormigón alternativo. Bajo el criterio de brindar la mejor trabazón a la mezcla y por ende reducir los espacios para la pasta cementante, se estableció realizar varias combinaciones y ver cual daba la mejor masa unitaria compactada.

Este ensayo alternativo se lo realizó con la ayuda de los implementos para la ejecución del ensayo de proctor estándar, es decir, un molde estándar de 4" (10.16 cm) de diámetro y un martillo compactador de 5.5 lb (2.5 kg) con 12" (30.48 cm) de caída libre. Y con la compactación de 3 capas de agregados a diferentes combinaciones, esta metodología encontraría una curva densidad vs porcentaje de desechos a usarse.

2.2 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS

2.2.1 Diseño de mezclas

Para la elaboración de la mezcla se usó el método del ACI 211.1, el cual se concibe en el principio de la relación agua/cemento. El método tiene una variabilidad dependiendo de la calidad del agregado, por lo que se usa como recomendación el cumplimiento de la norma ASTM C33 (ASTM, 2003) para el agregado fino y grueso (ACI 211, 1991).

Un diagrama de flujo que explica el método, se muestra a continuación:

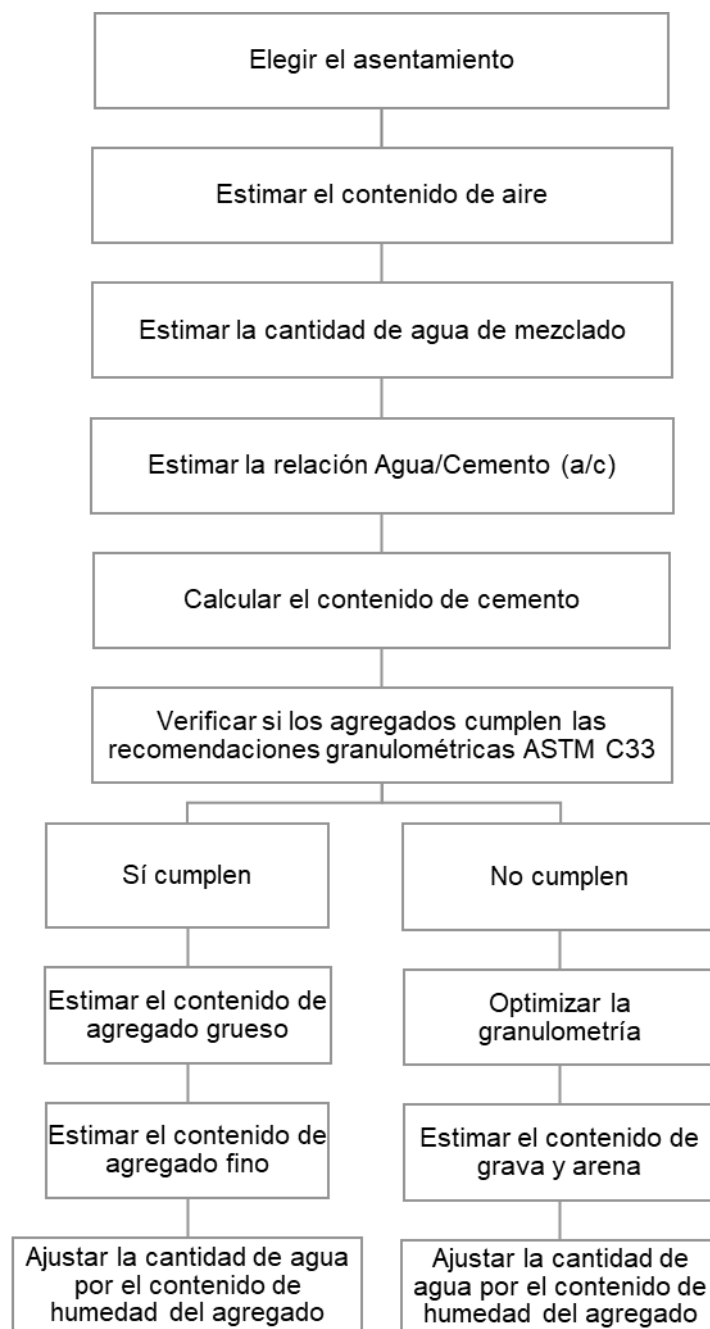


Figura 4 Proceso diseño de mezclas ACI 211.1

Como primer punto se estableció un asentamiento el cual depende del tipo de estructura y condiciones de colocación, como se puede observar en la Tabla 1.

Asentamiento (cm)	Consistencia (Tipo de concreto)	Grado de Trabajabilidad	Tipos de estructura y condiciones de colocación
-------------------	---------------------------------	-------------------------	---



0 – 2.0	Muy Seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibraciones de formaleta
2.0 – 3.5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados con máquina mecánica
3.5 – 5.0	Semi-seca	Pequeño	Losas medianamente reforzadas con vibración. Fundiciones en concreto simple. Pavimentos con vibradores normales.
5.0-10.0	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas y pavimentos, compactados a mano. Columnas, vigas, fundiciones y muros, con vibración.
10.0-15.0	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. No recomendable para compactarlo con demasiada vibración.

Tabla 1 Selección de asentamiento

Luego, con el tamaño máximo nominal de agregado grueso se estimó el porcentaje promedio de aire atrapado, por medio de la Tabla 2.

Agregado grueso		Porcentaje promedio aproximado de aire atrapado
Pulgadas	mm	
3/8	9.51	3.0
1/2	12.50	2.5
3/4	19.10	2.0
1	25.40	1.5
1 1/2	38.10	1.0
2	50.8	0.5
3	76.1	0.3

Tabla 2 Porcentaje promedio de airea atrapado



Seguido a esto, se estimó la cantidad de agua por medio del tamaño máximo nominal del agregado grueso, % de aire estimado y del asentamiento seleccionado, con la ayuda de la Tabla 3.

Agua en litros por metro cúbico de hormigón				
TMN agregado grueso	% de aire estimado	Asentamiento (cm)		
		3 a 5	8 a 10	15 a 18
3/8"	3.0	205	225	240
1/2"	2.5	200	215	230
3/4"	2.0	185	200	210
1"	1.5	180	195	205
1 1/2"	1.0	160	175	185
2"	0.5	155	170	180

Tabla 3 Contenido de agua por metro cúbico de hormigón

A continuación, se planteó una relación agua cemento, para una definida resistencia a la compresión a los 28 días de curado, por medio de la Tabla 4. El método ACI 211.1 está establecido para una resistencia máxima de 450 kg/cm², por lo que el primer diseño se realizó con esta resistencia.

Relación a/c	Resistencia media a la compresión (kg/cm ²) a los 28 días
	Hormigón sin aire incluido
0.30	450
0.33	420
0.36	390
0.40	350
0.44	315
0.49	280
0.54	245
0.60	210
0.75	140
0.86	105

Tabla 4 Relación agua/cemento para resistencia media a la compresión

Después se calculó la cantidad de cemento mediante la relación cantidad de agua para relación agua cemento. Esta cantidad de cemento se mantuvo fija, pero para poder alcanzar resistencias mínimas de 1000 kg/cm², lo que se realizó fue hacer una relación agua/cemento más pequeña por ende hubo que reducir la cantidad de agua en comparación a la establecida anteriormente.



Posteriormente se estableció el volumen de grava seca y compactada por unidad de volumen de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena, por medio de la Tabla 5.

TMN agregado grueso	Volumen de grava seca y compactada por unidad de volumen de hormigón			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	0.76	0.74	0.72	0.70
2"	0.78	0.76	0.74	0.72

Tabla 5 Volumen de grava por metro cúbico de hormigón

Para obtener la masa por metro cubico de hormigón se multiplicó al agregado con su respectiva masa unitaria.

Para establecer la cantidad de agregado fino a usar, se conocía de antemano que el diseño se realizaba para un metro cubico de hormigón, por lo que se realizó la suma de todos los volúmenes antes adquiridos y el faltante para el metro cúbico, es el volumen de agregado fino.

2.2.2 Elaboración de mezclas

Los agregados minerales después de ser lavados, caracterizados y considerados aptos granulométricamente para la mezcla de hormigón, se los secó en la hornilla, porque a consideración del autor se logra tener una mejor uniformidad y control del agua que se requiere en la mezcla por factores como absorción e hidratación.

El agua usada para elaboración/curado del concreto, es agua potable de la ciudad de Cuenca.

Al material reciclado triturado se consideró que no tenía una capa superficial de finos que afecten la adherencia o absorban el agua, ni tampoco se encontraba sucio con materia orgánica, por lo que no se realizó un lavado del residuo triturado. El material se encontraba todo el tiempo fuera de contacto con factores que lo pudieran humedecer, por lo que se consideró como material seco al momento de la elaboración del hormigón.



Para la confección de las muestras de hormigón ya sea con agregado mineral o reciclado o combinado, después de tener todos los elementos pesados, primeramente, se en humedeció la concretera con el fin de no permitir que su pared absorba el agua útil para la hidratación del cemento, y se lo dejó escurrir por un 1 minuto para que no altere la relación agua/cemento determinada para la mezcla.

Después, se mezcló por un minuto en la concretera todo el agregado grueso, agregado fino y un tercio de agua. Luego se añadió todo el cemento, un tercio más de agua y se mezcló por dos minutos. El tipo de cemento usado es el Cemento Portland tipo 3, denominado de alta resistencia inicial, el cual adquiere altas resistencias en tiempos cortos. Añadido el cemento se tapó la concretera con una funda plástica especialmente los primeros segundos hasta que se combine el cemento con los agregados. A continuación, se colocó un aditivo de tipo súper plastificante llamado ViscoCrete 4100 combinado con el resto de agua en la mezcla y se encendió la concretera por cuatro minutos. Finalmente, con la ayuda de una cuchareta se limpió las paredes de lo que puede ser agregado o cemento que no se combinó, se dejó dos minutos en reposo la mezcla, y se volvió a mezclar por 4 minutos (INEN, 2010e).



Figura 5 Elaboración de mezclas de hormigón

Una vez terminado de mezclar se usó una parte de la mezcla para el ensayo de trabajabilidad y el resto para la elaboración de cuatro cilindros, los cuales sirvieron para determinar las características en endurecido del hormigón.

Para el ensayo de asentamiento se colocó el cono de Abrams encima de una superficie plana no absorbente, luego se sujetó con los pies las agarraderas para no permitir que el hormigón se derrame por debajo. Seguido a esto se colocó el hormigón mediante tres capas hasta llenarlo. Cada capa se apisonó con 25 golpes, dados con una varilla lisa de 16mm de diámetro y cabeza redondeada.



Llenado el cono se procedió a enrasar, para por último por medio de un movimiento vertical, se retiró y midió cuanto se asienta. Esta medida se la realizó dando la vuelta al cono, colocando encima la misma varilla y midiendo desde la superficie superior que se forma del hormigón con el centro de la varilla (INEN, 2010f).

Para el llenado de los moldes se usan los de 10x20cm se cumplen con la norma ASTM C470 (ASTM C470, 2012). Primeramente, se apretó bien los pernos con la finalidad de garantizar hermeticidad y no filtre el agua de la mezcla, luego se engrasó en el interior para al momento de desencostrar, el cilindro de hormigón resbale.

La colocación del hormigón en el molde cilíndrico se hizo en tres capas de aproximadamente igual volumen, cada una de ellas compactadas con una varilla lisa de 16mm de diámetro por medio de 25 golpes sobre toda la superficie y además se retiró las burbujas internas a cada capa de la mezcla por medio de golpes al molde con un martillo de goma. El varillado debe de ser fuerte, pero sin intentar llegar a la capa inferior, y los golpes con el martillo de goma no deben ser excesivos ya que pueden provocar que el agregado de la mezcla se asiente, causando que en la parte superior del cilindro quede solo mortero. Una vez terminada la última capa, se enrazó, dio un acabado liso y colocó el molde en un lugar plano no expuesto a factores como el viento, lluvia o elevadas temperaturas (INEN, 2010e).

Se dejó que fragüe por aproximadamente 24 horas, luego se desencostró y colocó en la piscina de curado. Este curado es útil para garantizar la completa hidratación del cemento. Un factor para conocer la calidad de agua para el curado es que de preferencia no manchen la superficie del cilindro, pero el más decidor es que no contengan sustancias que afecten el curado (Niño Hernandez, 2010). El agua de la piscina de curado de la facultad es proveniente de agua potable, y se ha establecido la aceptabilidad de esta agua. Los cilindros de hormigón, en todas sus combinaciones de agregados, permanecieron 7, 14 y 28 días en curado para su ensayo a compresión y 28 días en curado para el ensayo a tracción indirecta (INEN, 2010e).



Figura 6 Curado en sumersión en agua de cilindros de hormigón

2.3 PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO

En el hormigón endurecido por lo general las propiedades mecánicas están relacionadas con la resistencia de la pasta endurecida, la resistencia del agregado y la adherencia entre la pasta y los agregados (Niño Hernandez, 2010). Para la investigación se determinó como afecta o beneficia el uso de la porcelana triturada en los factores antes mencionados, por medio de los ensayos de los a compresión y tracción indirecta en los cilindros de hormigón.

2.3.1 Ensayo de resistencia a la compresión

Este ensayo se lo realiza mediante el aplicar carga axial sobre las caras circulares extremas del cilindro. La resistencia a la compresión se determinó usando la prensa del laboratorio de la facultad de arquitectura.



Figura 7 Ensayos de resistencia a compresión

El ensayo se lo realizó lo más pronto después de retirado de curado, procurando estar dentro de la tolerancia de tiempos admisibles para el ensayo del especímenes. Se usaron neoprenos para transmitir la carga de manera uniforme y

se colocó en la prensa. El cilindro debe de estar lo más centrado posible, ya que en hormigones de alta resistencia una excentricidad de hasta 6mm puede afectar la resistencia a compresión hasta un 6% o más (Aïtcin, 2008, Capítulo 15). La velocidad de esfuerzo aplicado sobre el espécimen fue de 0.25 MPa/s. La carga fue aplicada hasta que el indicador automático de la prensa se detuvo (INEN, 2010d).

2.3.2 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta

Para estimar la resistencia a la tracción por medio de los cilindros se propuso realizar el método de tracción indirecta.

El ensayo consiste en aplicar carga a compresión en el sentido longitudinal de la probeta cilíndrica, hasta que se produzca la falla. Para tener un mejor control de si se está aplicando la carga en la manera correcta, se dibujaron dos líneas una opuesta a la otra en la superficie del cilindro y ahí es donde se aplicó la carga. El equipo que se usó fue la misma prensa para el ensayo a compresión, a una velocidad de 0.9 MPa/min (ASTM C496, 1996).



Figura 8 Ensayo de tracción indirecta

Del ensayo se obtuvo la carga máxima que resiste el cilindro mediante el ensayo de tracción indirecta, por lo que para conocer la resistencia a tracción se aplica la siguiente expresión:

$$T = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot L \cdot D}$$

Donde:

T = resistencia a la tracción indirecta [kg/cm²]

P = carga máxima aplicada señalada por la máquina de ensayo [kg]



L = longitud [cm]

D = diámetro [cm]

Pero para lo que es el diseño de pavimentos rígidos es necesario conocer la resistencia a la tracción por flexión o más conocido como el módulo de ruptura. Por lo que se usó la correlación existente entre la resistencia a tracción indirecta y el módulo de ruptura impuesta por Adam M. Neville (INECYC, 2009).

$$MR = 1.333 \times T$$

Donde:

MR= Módulo de ruptura [kg/cm²]

T = resistencia a la tracción indirecta [kg/cm²]

2.4 SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL

En el sector de la construcción el desarrollo sostenible se ha convertido en un reto que trata de ajustar las necesidades del hombre con la capacidad del planeta (Rodríguez & Fernández, 2010). Criterios de sostenibilidad desde los inicios del proyecto y ayuda en la toma de decisiones de diferentes alternativas que se pueden generar para cumplir con el objetivo de la infraestructura, pueden ser obtenidas por medio de herramientas de sostenibilidad. Estas herramientas también justifican costos extras, debido a que existen estándares, mantenimientos futuros o metas que se espera cumplir en la infraestructura a lo largo de su vida útil.

Las herramientas medioambientales se clasifican en herramientas de calificación y calculadoras. Las herramientas de calificación, certifican o premian la infraestructura por puntos obtenidos mediante acciones sostenibles diseñadas a lo largo de su ciclo de vida. Las herramientas calculadoras brindan información cuantitativa sobre la cantidad de impacto ambiental producido, con respecto a información de diseño.

Por medio de estas herramientas se pretende hallar la colaboración del uso de la porcelana como agregado grueso en la elaboración del hormigón, para la obtención de puntos en la certificación o cuantificación del impacto medioambiental de la infraestructura.



2.4.1 LEED

LEED, o Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental, es una herramienta calificadora de prestigio para infraestructuras ecológicas. Proporciona una guía para crear edificios saludables, eficientes y económicos. Y cuenta con un reconocimiento a nivel mundial con respecto al logro de la sostenibilidad (U.S. Green Building Council, 2018).

Es una herramienta que por medio de agentes externos aprueba el rendimiento de la construcción. Y, además esa certificación no significa que el valor de la estructura cueste más, por el contrario, con respecto al nivel de certificación que se espera obtener, se puede conseguir a lo largo de su ciclo de vida un retorno de los primeros costos invertidos para características sostenibles (U.S. Green Building Council, 2018).

Para la certificación se debe de cumplir con una serie de pasos y elaborar un plan de trabajo, para luego ser enviado, revisado y aprobado o denegado por personal calificado LEED.

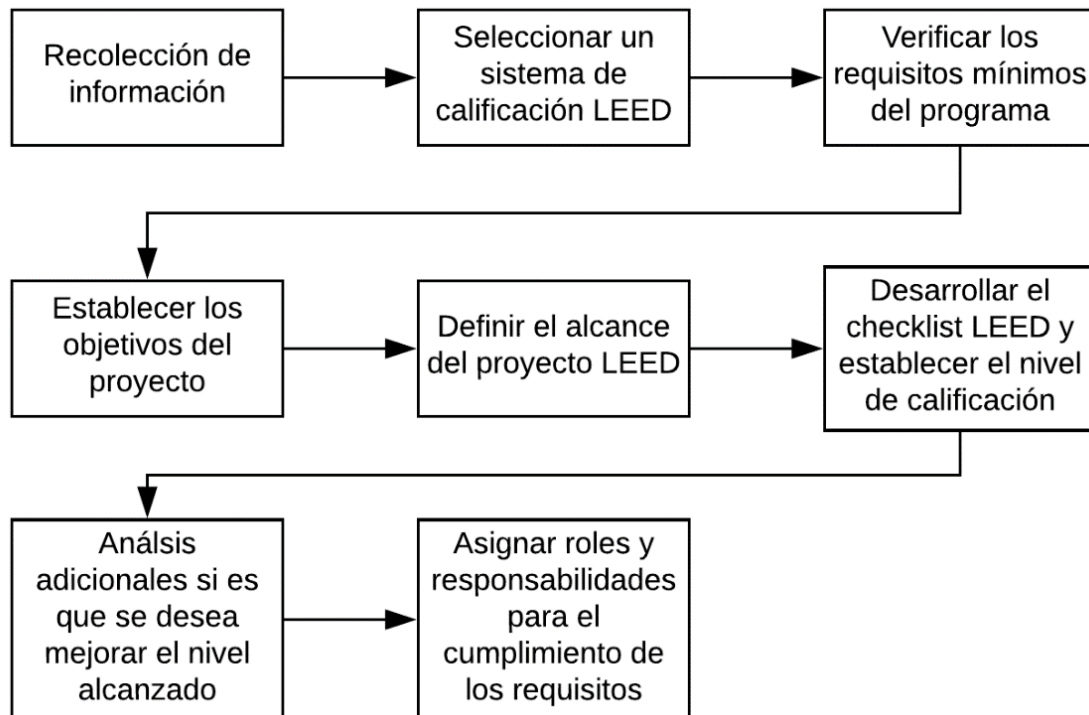


Figura 9 Proceso de certificación LEED

Por lo que, para establecer el beneficio otorgado por el uso de porcelana como agregado grueso en el hormigón, se realizó el llenado del checklist obtenido de la página oficial (LEED v4 for BD+C: New Construction and Major Renovation) y se definió a criterio propio el alcance que va a tener la infraestructura, para establecer los puntos a obtener y determinar el nivel de certificación que se logra alcanzar, sabiendo que para obtener un nivel LEED se necesita de 40 a 49 puntos para obtener un Certificado, de 50 a 59 puntos para la certificación Silver, de 60 a 79 puntos para la certificación Gold y 80 puntos o más para obtener la certificación Platinum.

El checklist consta de 8 secciones: Ubicación y Transporte, Sitios Sostenibles, Uso Eficiente del Agua, Energía y Atmósfera, Materiales y Recursos, Calidad Ambiental Interior, Innovación y Prioridad Regional.

De estas secciones, los que más tuvieron que ver con el uso de los desechos en la hora de la construcción de la infraestructura son Materiales y Recursos y la sección de Innovación. Materiales y Recursos se concentra directamente en la reducción de impacto ambiental generado por los materiales de la edificación



durante su extracción, fabricación y transporte. Y la sección Innovación reconoce características ecológicas e innovadores que no se contemplan de manera precisa en el sistema de calificación LEED (U.S. Green Building Council, 2018).

2.4.2 Greenroads

Greenroads es una herramienta calificadora que asigna una certificación por el personal de Greenroads, basado en una revisión de todos los documentos del proyecto.

Para establecer beneficio producido por el uso de agregado reciclado en la elaboración de hormigón para la obtención de una certificación por medio de la herramienta greenroads se usó la versión on-line Greenroads v2 Project Checklist. Esta checklist está compuesta por siete categorías y se explican mejor a continuación:

Requerimientos del proyecto	Actividades básicas obligatorias para ser consideradas "sostenibles"
Medio ambiente y agua	Promover las mejores prácticas ambientales relacionadas con el uso de la tierra, el hábitat, el agua y otros recursos ecológicos.
Actividades de construcción	Promover las mejores prácticas ambientales, sociales y económicas para la construcción más allá del cumplimiento mínimo.
Materiales y diseño	Promover prácticas responsables para la administración de materiales a fin de reducir los costos, extender la vida útil y reducir el mantenimiento.
Utilidades y controles	Promueva las mejores prácticas para mejorar las operaciones, mejorar la movilidad, sistemas eficientes y mejorar la experiencia del usuario.
Acceso y habitabilidad	Promueva las mejores prácticas para mejorar la calidad de vida, incluida la seguridad, la salud humana, el acceso, la justicia social y la creación de lugares.
Creatividad y esfuerzo	Promover prácticas que son únicas y superan las expectativas de rendimiento.

Tabla 6 Categorías del checklist Greenroads



Existen cuatro niveles de certificación que permite alcanzar Greenroads por medio del cumplimiento de los requisitos para entrar a evaluación más un número de puntos adquiridos en el checklist, estos son:

- Bronce: Requerimientos del proyecto + 40-49 puntos
- Plata: Requerimientos del proyecto + 50-59 puntos
- Oro: Requerimientos del proyecto + 60-79 puntos
- Evergreen: Requerimientos del proyecto + 80-130 puntos

Como ejemplo se usó a criterio propio el desarrollo de una nueva infraestructura vial de pavimento rígido, donde se usó el agregado reciclado. Este aporte por el uso de materiales reciclados más intervino en la categoría materiales y diseño y en creatividad y esfuerzo.

2.4.3 PaLATE V2.2

PaLATE es una herramienta calculadora, que permite medir el impacto ambiental y económico de los pavimentos y carreteras. Permite medir factores como el consumo de energía y emisiones de CO₂, NO_x, PM₁₀, SO₂, CO por medio del CO₂ equivalente obtenido directamente de la herramienta (Muench et al., 2011)

En esta herramienta se colocó como datos de entrada las cantidades de materiales, en que van a ser transportados y las distancias de transporte. El lugar donde se planteó la adquisición de los agregados minerales se estableció de la cantera de Hormicreto ubicada en el Sector del Descanso y para adquirir los desechos de la planta de Graiman. El lugar donde se propone la elaboración de la mezcla es en la planta hormigonera Hormicreto, con el uso de los desechos de su empresa hermana Graiman.

La herramienta también permite establecer mantenimientos futuros a la infraestructura, pero se omitió este punto en la actual investigación, puesto que el uso de la porcelana es solo en la fase inicial, en la construcción.



Para la investigación se planteó elaborar la producción de hormigón realizada por Hormicreto en el año 2014, que son 38401 m³ (Aguilar Sarmiento, 2015).

La utilización de la porcelana en la herramienta PaLAte se considera como si no se pusiera en la mezcla, pero si resta esa cantidad de material del total de la mezcla, esto es debido a que este material ya cumplió su ciclo de vida y ya no produce ninguna utilidad para lo que fue creado. Pero para usarlo como agregado se requirió triturarlo, por lo que ese consumo de energía se le sumó al resultado final del consumo de energía de la mezcla con agregado reciclado, y se estableció cual es más beneficioso medioambientalmente en comparación con la energía producida y las emisiones CO₂ equivalente del hormigón patrón.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO MINERAL Y RECICLADO

3.1.1. Granulometría

Realizada la granulometría al agregado grueso mineral, se obtuvo un tamaño máximo nominal (TMN) 3/8" y un análisis granulométrico que cumple con la ASTM C33 (Especificaciones del agregado para concreto), como se muestra a continuación:

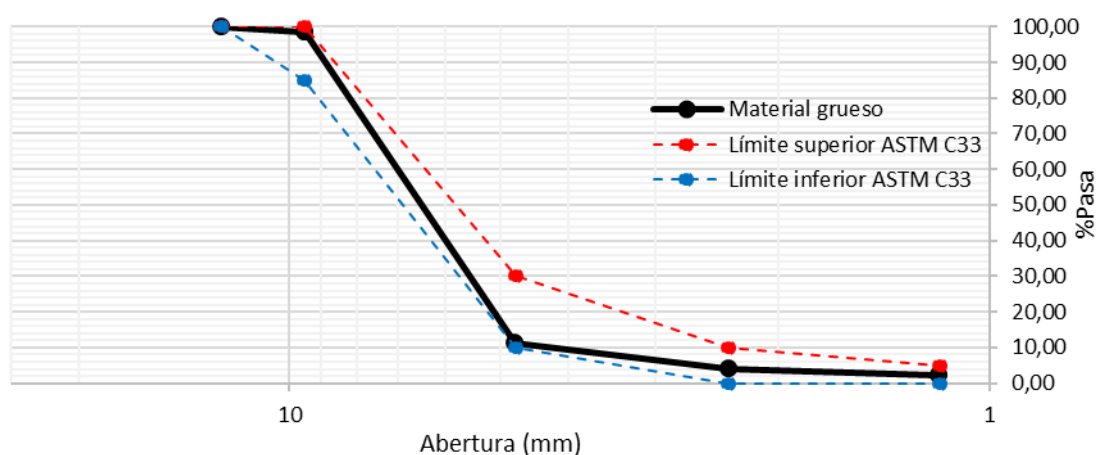


Figura 10 Curva granulométrica agregado grueso mineral



Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Pasa
1 1/2"	37.5	0.00	0.00	100.00
1"	25	0.00	0.00	100.00
3/4"	19	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.5	69	1.38	98.62
N° 4	4.75	4372	87.44	11.18
N° 8	2.36	354	7.08	4.10
N° 16	1.18	91	1.82	2.28
Fondo		114	2.28	0.00
TOTAL		5000	100.00	

Tabla 7 Granulometría agregado grueso mineral

El agregado fino presenta características granulométricas bien graduada y con un módulo de finura de 3.57 (arena gruesa), la cual es considerada satisfactoria para brindar trabajabilidad y altas resistencias a compresión (Paranese & William, 2004). Además, cumple con la ASTM C33, requerida para el diseño de la mezcla de concreto por el método del ACI.

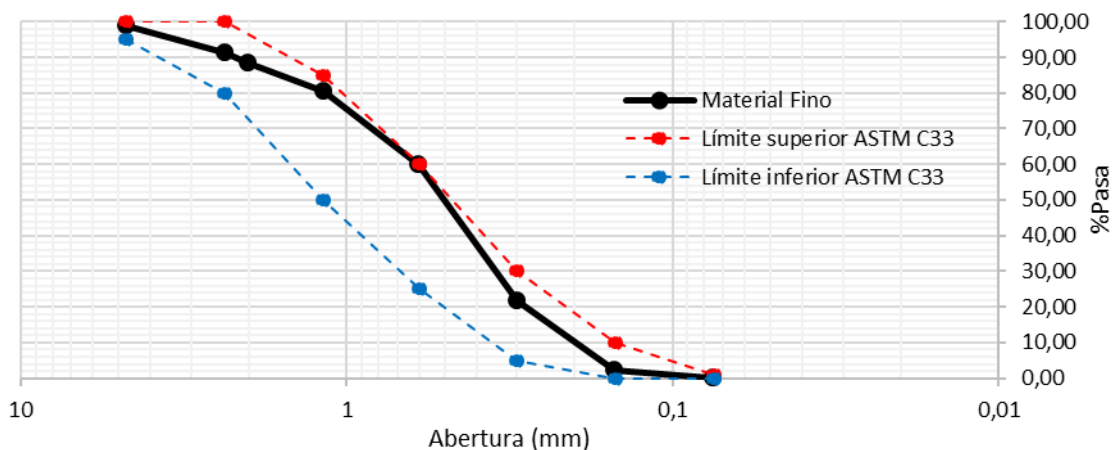


Figura 11 Curva granulométrica agregado fino

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Pasa
4	4.75	3.5	1.00	99.00
8	2.36	27.3	7.80	91.20
10	2	10	2.86	88.34
16	1.18	27.5	7.86	80.48
30	0.6	72.5	20.71	59.77
50	0.3	133.4	38.11	21.66

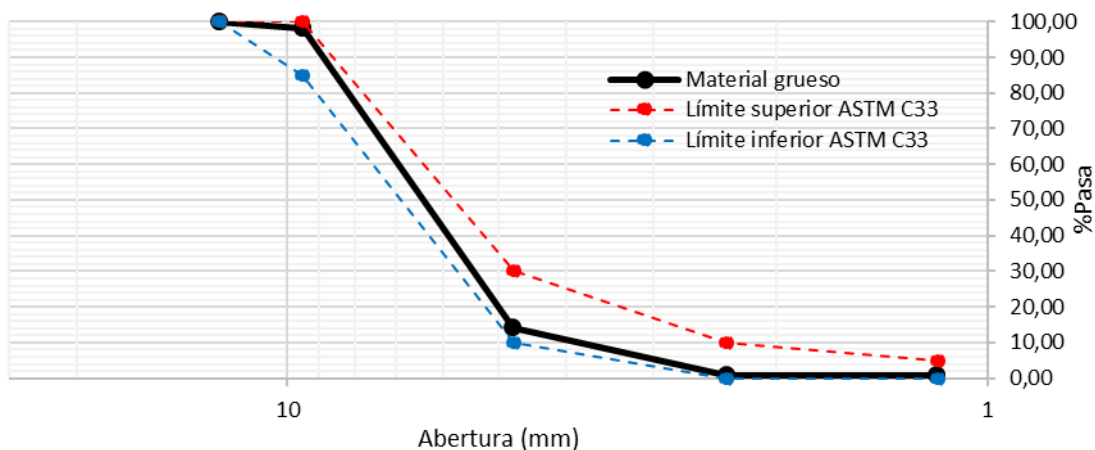


100	0.15	68.6	19.60	2.06
200	0.075	7	2.00	0.06
Fondo	0	0.2	0.06	0.00
TOTAL		350	100.00	

Tabla 8 Granulometría agregado fino mineral

Por medio del tamizado realizado al agregado reciclado se pretendía conocer la composición de diversos tamaños del agregado y también recolectar el material que será usado para la elaboración del hormigón. Después del triturado se pudo observar una buena cantidad de material en condiciones de polvo, por lo que lo primero que se hizo es desechar el material pasante al tamizo N° 8, ya que es el tamiz fino grande de menor abertura con el que se cuenta en el laboratorio, y se obtuvo que el 70% aproximadamente del material triturado se puede usar como agregado grueso.

De ese 70% de agregado superior al tamiz N° 8, se realizó la granulometría, obteniéndose que cumple que con la ASTM C33, por lo que se considera apta para el método ACI 211.1.





N°16	1.18	0	0.00	0.68
Fondo	0	34	0.68	0.00
TOTAL		5000	100.00	

Tabla 9 Granulometría agregado grueso reciclado

3.1.2. Densidad relativa y absorción

Los resultados obtenidos del ensayo de densidad para el agregado grueso son

A (gr)	2991.6
B (gr)	3072.7
C (gr)	1900
Densidad relativa SH	2.55
Densidad relativa SSS	2.62
Densidad relativa aparente	2.74
Densidad SH (kg/m ³)	2544.66
Densidad SSS (kg/m ³)	2613.64
Densidad aparente (kg/m ³)	2733.71
% Absorción	2.71

Tabla 10 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso mineral

Para el agregado fino los resultados que se obtuvieron del ensayo fueron:

A (gr)	492.6
R1 (cm ³)	0.6
R2 (cm ³)	20.1
S (gr)	500
S1 (gr)	55
Densidad relativa SH	2.78
Densidad relativa SSS	2.83
Densidad relativa aparente	2.90
Densidad SH (kg/m ³)	2778.77
Densidad SSS (kg/m ³)	2820.51
Densidad aparente SSS (kg/m ³)	2900.13
% Absorción	1.50

Tabla 11 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino mineral

Mientras que para el residuo de porcelana siguiendo el mismo procedimiento que para el agregado grueso mineral se obtuvieron los siguientes resultados:



A (gr)	2000
B (gr)	2024.4
C (gr)	1170.9
Densidad relativa SH	2.34
Densidad relativa SSS	2.37
Densidad relativa aparente	2.42
Densidad SH (kg/m ³)	2337.43
Densidad SSS (kg/m ³)	2365.95
Densidad aparente (kg/m ³)	2406.22
% Absorción	1.22

Tabla 12 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso reciclado

El agregado mineral posee una densidad 1.09 veces mayor a la del agregado reciclado, y una absorción 2.22 veces mayor. Lo que nos muestra que el grano de agregado reciclado es mucho más compacto, pero con materiales un poco más livianos. Características que brindan aceptabilidad del agregado reciclado.

3.1.3. Masa unitaria

Del agregado fino se obtuvo una masa unitaria compacta de 1505.07 kg/m³ y del agregado grueso mineral 1544.24 kg/m³.

El análisis alternativo, que se explica en la metodología, no brindó una relación entre agregado grueso y agregado reciclado óptimo que propicie una densidad máxima como se esperaba. Los resultados muestran que mientras menos agregado reciclado se use, mayor densidad tiene esta muestra, haciendo no posible establecer una relación de agregados óptima.

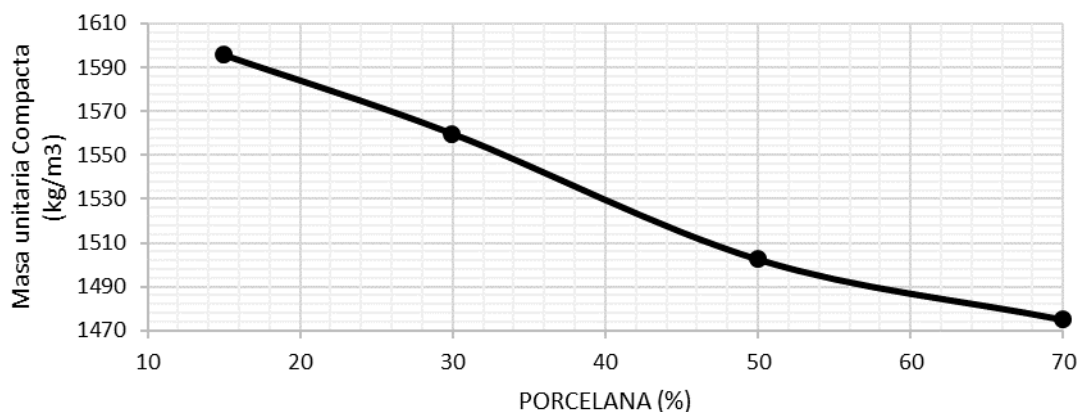


Figura 13 Combinación de agregados mineral - reciclado



Este resultado obligó a buscar otra manera de establecer la factibilidad del uso de residuo de porcelana como agregado grueso en la elaboración de hormigón, por lo que se planteó usar diferentes combinaciones para elaborar las mezclas de hormigón.

3.2. DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS

3.2.1. Diseño de mezclas

Luego del cumplimiento de las características del agregado a la norma ASTM C33, en este apartado primeramente se diseñó un hormigón patrón con agregado mineral y relación $a/c=0.25$ que dé como resultado un hormigón de alta resistencia (etiqueta 100%G), luego se realizaron varias combinaciones entre los agregados grueso mineral y reciclado, primeramente se reemplazó un 30% del agregado mineral (etiqueta 70%G), posterior a eso se reemplazó un 50% del agregado mineral (etiqueta 50%G), luego un reemplazó del 70% del agregado mineral (etiqueta 30%G) para finalmente reemplazar el 100% del agregado mineral por porcelana triturada (etiqueta 100%P).

Diseño de hormigón patrón de alta resistencia 100% gravilla			
ETIQUETA: 100%G	RESISTENCIA: 1000 kg/cm ²		
	ASENTAMIENTO: la mezcla fluye		
MATERIALES	MATERIALES /m ³		MATERIALES MEZCLA (13 lts)
	PESO SECO	VOLUMEN	PESO SECO
	kg	lts	kg
CEMENTO HE	621.21	200.39	8.08
AGUA	155.30	155.30	2.02
ARENA	918.22	316.63	11.94
GRAVILLA 3/8"	679.46	247.98	8.83
VISCOCRETE 4100 (1.4%)	8.70	7.91	0.11
AIRE		71.80	
SUMA		1000	

Tabla 13 Diseño mezcla hormigón patrón 100%G

Diseño de hormigón de alta resistencia 70% gravilla 30% porcelana		
ETIQUETA: 70%G	RESISTENCIA: 1000 kg/cm ²	
	ASENTAMIENTO: la mezcla fluye	
MATERIALES	MATERIALES /m ³	MATERIALES MEZCLA (13 lts)



Universidad de Cuenca

	PESO SECO	VOLUMEN	PESO SECO
	kg	lts	kg
CEMENTO HE	621.21	200.39	8.08
AGUA	155.30	155.30	2.02
ARENA	892.11	307.62	11.60
PORCELANA 3/8"	203.84	84.23	2.65
GRAVILLA 3/8"	475.62	173.58	6.18
VISCOCRETE 4100 (1.4%)	8.70	7.91	0.11
AIRE		70.96	
SUMA		1000	

Tabla 14 Diseño mezcla de hormigón 70%G - 30%P

Diseño de hormigón de alta resistencia 50% gravilla 50% porcelana			
ETIQUETA: 50%G	RESISTENCIA: 1000 kg/cm ²		
	ASENTAMIENTO: la mezcla fluye		
MATERIALES	MATERIALES /m ³		MATERIALES MEZCLA (13 lts)
	PESO SECO	VOLUMEN	PESO SECO
	kg	lts	kg
CEMENTO HE	621.21	200.39	8.08
AGUA	155.30	155.30	2.02
ARENA	873.63	301.25	11.36
PORCELANA 3/8"	339.73	140.38	4.42
GRAVILLA 3/8"	339.73	123.99	4.42
VISCOCRETE 4100 (1.4%)	8.70	7.91	0.11
AIRE		70.78	
SUMA		1000	

Tabla 15 Diseño mezcla de hormigón 50%G - 50%P

Diseño de hormigón de alta resistencia 30% gravilla 70% porcelana			
ETIQUETA: 30%G	RESISTENCIA: 1000 kg/cm ²		
	ASENTAMIENTO: la mezcla fluye		
MATERIALES	MATERIALES /m ³		MATERIALES MEZCLA (13 lts)
	PESO SECO	VOLUMEN	PESO SECO
	kg	lts	kg
CEMENTO HE	621.21	200.39	8.08
AGUA	155.30	155.30	2.02
ARENA	854.20	294.55	11.10
PORCELANA 3/8"	475.62	196.54	6.18
GRAVILLA 3/8"	203.84	74.39	2.65
VISCOCRETE 4100 (1.4%)	8.70	7.91	0.11
AIRE		70.92	
SUMA		1000	

Tabla 16 Diseño mezcla de hormigón 30%G - 70%P

Diseño de hormigón de alta resistencia 100% porcelana



ETIQUETA: 100%P	RESISTENCIA: 1000 kg/cm ²		
	ASENTAMIENTO: la mezcla fluye		
MATERIALES	MATERIALES /m³		MATERIALES MEZCLA (13 lts)
	PESO SECO	VOLUMEN	PESO SECO
	kg	lts	kg
CEMENTO HE	621.21	200.39	8.08
AGUA	155.30	155.30	2.02
ARENA	823.13	283.84	10.70
PORCELANA 3/8"	679.46	280.77	8.83
VISCOCRETE 4100 (1.4%)	8.70	7.91	0.11
AIRE		71.79	
SUMA		1000	

Tabla 17 Diseño mezcla de hormigón 100%P

3.2.2. Elaboración de mezclas

Para la elaboración y curado de las mezclas se usó agua potable de la ciudad de Cuenca, la cual por el hecho de ser potable, puede ser usada en la elaboración del hormigón (NEC, 2015), sin la necesidad de ninguna inspección posterior (ASTM 1602, 2012). Y para que el agua cumpla como agua potable debe cumplir con los límites máximos permitidos establecidos en la INEN 1108 (INEN, 2011a).

PARÁMETRO	VALOR	LÍMITE MÁXIMO PERMITIDO	UNIDAD
TURBIEDAD	0.5	5	NTU, FTU
COLOR APARENTE	14.0	15	UC, Pt Co
COLOR REAL	10.0	-	UC, Pt Co
CONDUCTIVIDAD	110.0	-	microsiemens/cm
SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES	72.6	-	mg/l
PH	7.20	-	
ALCALINIDAD TOTAL	58.0	-	mg/l, CaCO ₃
ALCALINIDAD F.	0.0	-	mg/l, CaCO ₃
ACIDEZ	-	-	mg/l, CaCO ₃
CO ₂	-	-	mg/l
DUREZA TOTAL	50.0	-	mg/l, CaCO ₃
Ca ⁺⁺	2.0	-	mg/l
Mg ⁺⁺	10.9	-	mg/l



Na+	-	-	mg/l
K+	-	-	mg/l
HIERRO TOTAL	0.02	-	mg/l
MANGANESO	0.01	0.4	mg/l
ZINC	0.01	-	mg/l
COBRE	0.0	2.0	mg/l
ALUMINIO	0.09	-	mg/l
NIQUEL	-	0.07	mg/l
CROMO	-	0.05	mg/l
FLUORURO	0.02	1.5	mg/l
SILICIO	2.41	-	mg/l
P. ORTOFOSFATO DISUELTOS	0.02	-	mg/l
CLORUROS	3.5	-	mg/l
SULFATOS	8.0	-	mg/l
N. AMONICAL	0.03	-	mg/l
N. NITRITOS	0.0	0.2	mg/l
N. NITRATOS	0.03	50	mg/l
TANINOS Y LIGNINAS	0.0	-	mg/l
AEROBIOS MESOFILOS	0.0	-	colonias/ml
COLIFORMES TOTALES	0.0	1.0	NMP,/100 ML
E. COLI	0.0	-	NMP,/100 ML
MOHOS Y LEVADURAS	0.0	-	colonias/ml
PSEUDOMONAS	0.0		U.F.C./100 ML

Tabla 18 Análisis físico - químico y bacteriológico de agua
Fuente: (Vélez Guayasamín, 2013), (INEN, 2011a)

El cemento usado es cemento Holcim HE, el cual es un cemento hidráulico de tipo 3 (ASTM C150, 2012), de altas resistencias iniciales que cumple con la norma NTE INEN 2380, certificando requisitos mínimos de desempeño (INEN, 2011b). Este es un cemento que permite un desencofrado rápido y muy útil para obras que requieran ser puestas en servicio rápidamente y no esperar los 28 días de curado como en un hormigón de resistencia normal (Holcim Ecuador S.A., 2015). Los requisitos físicos del cemento son:

	INEN 2380	Valor referencial
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	0.80	-0.04
Tiempo de fraguado, método de Vicat		
No menos de, minutos	45	150
No más de, minutos	420	



Contenido de aire del mortero, en volumen, %		3
Resistencia a la compresión, MPa, mínimo		
1 día	12	14
3 días	24	25
7 días	-	32
28 días	-	40
Expansión en barras de mortero 14 días, % más.	0.020	0.001

Tabla 19 Requisitos físicos del cemento Holcim HE
Fuente: (Holcim Ecuador S.A., 2015)

El aditivo usado es el Sika ViscoCrete 4100 de tipo de alto rango y superplastificante, brindando trabajabilidad a la mezcla por más de una hora, proporciona mezclas fluidas, pero manteniendo la cohesión. El aditivo posee un aspecto líquido translúcido y una densidad de 1.1 gr/cc (Sika Ecuatoriana S.A., 2015).

3.3. PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO

3.3.1. Ensayos de resistencia a la compresión

Los ensayos a compresión de los diferentes cilindros dieron los siguientes resultados:

		100% Grava	70% Grava – 30% Porcelana	50% Grava – 50% Porcelana	30% Grava – 70% Porcelana	100% Porcelana
DÍAS	7	952	945	799	787	776
	14	982	957	906	859	851
	28	1043	1037	969	909	867

Tabla 20 Resultados ensayos resistencia a compresión

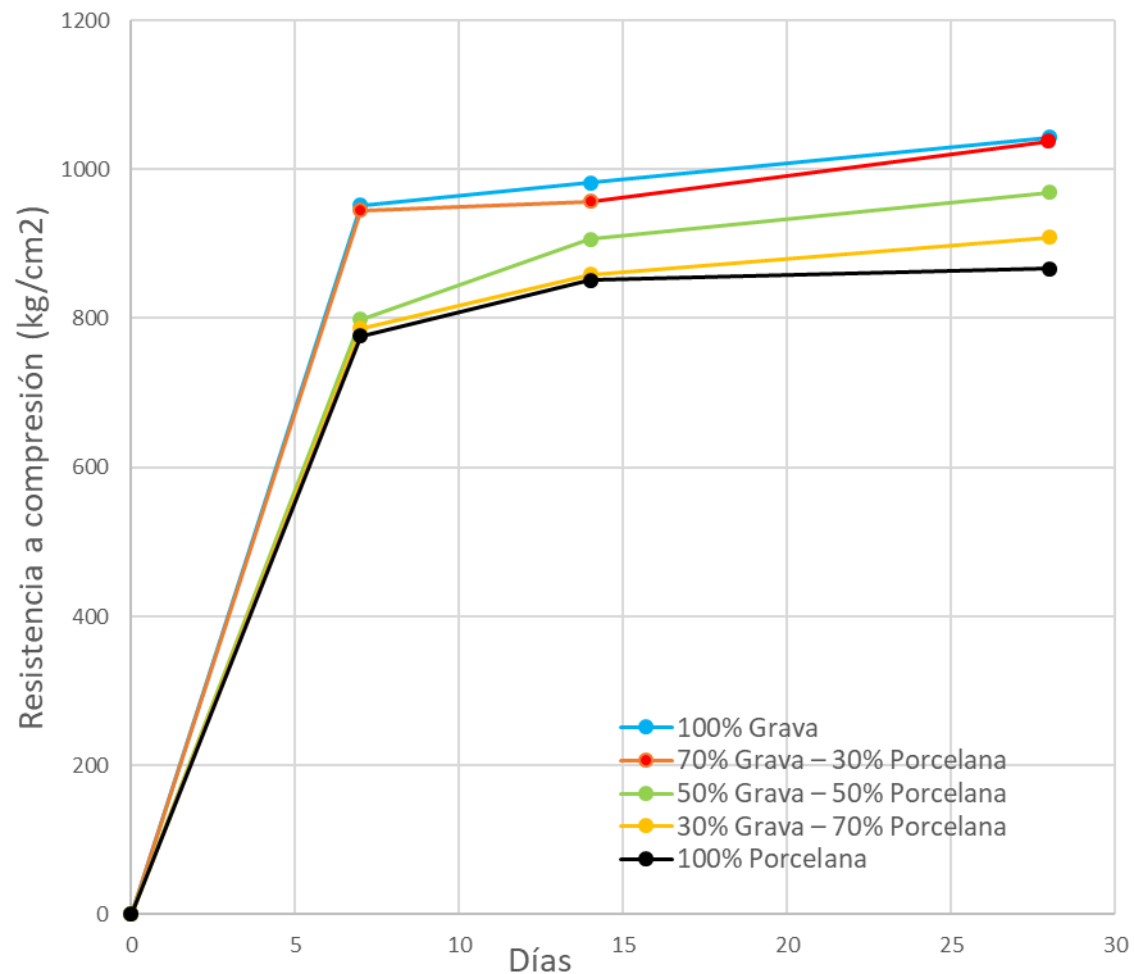


Figura 14 Curva resistencia a compresión vs tiempo

Una diferencia de 176 kg/cm² entre los cilindros de 100% grava y 100% porcelana a los 28 días, nos muestra que los desechos de porcelana si afectan la resistencia, y se ha establecido que es debido a la cara liza que esta contiene afectando la adherencia. Pero esta desventaja en el agregado reciclado no hace que el hormigón deje de ser de alta resistencia, sabiendo que un hormigón de alta resistencia es desde los 700 kg/cm² (Portland Cement Association, Panarese, Bringas, & Kosmatka, 1992).

Además, se puede observar que con una combinación 70% grava – 30% porcelana, se obtienen resistencias similares, siendo ésta una cantidad óptima para la combinación de los agregados y obtener la misma resistencia de diseño.

3.3.2. Ensayo de resistencia a la tracción

Los resultados de los ensayos a tracción indirecta son los siguientes:



Ensayo a tracción indirecta				
Nomenclatura	Edad (Días)	Carga de Rotura (Kg)	T (kg/cm ²)	MR (kg/cm ²)
100%G	28	16050.3	51.09	68.10
70%G	28	15978.8	50.86	67.80
50%G	28	14253.3	45.37	60.48
30%G	28	13617.4	43.35	57.78
100%P	28	12002.1	38.20	50.93

Tabla 21 Resultados ensayos a tracción indirecta

Como se puede observar con respecto al hormigón patrón el que mejor se asemeja es el de 70% grava – 30% porcelana, comprobando de esta manera también que esta es la combinación de agregados óptima.

Además, como se puede observar en todas las combinaciones incluyendo con 100% porcelana presenta un buen comportamiento ante la resistencia a la flexión, sabiendo que valores recomendados de módulo de ruptura de buena calidad para el uso en pavimentos rígidos es de 35kg/cm² (Portland Cement Association, 1984).

3.4. SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL

3.4.1. LEED V4

Por medio del checklist de LEED V4 se pudo establecer que, para una nueva construcción y renovaciones importantes, el uso de porcelana reciclada como agregado en el hormigón aporta con 18 puntos de los 40 mínimos requeridos para la obtención de una certificación LEED. El aporte viene directamente dado de la sección de Materiales y Recursos brindando 13 de los 13 puntos posibles y de la sección de Innovación, aportando con 5 de 6 puntos posibles.



Universidad de Cuenca



LEED v4 para BD+C: Nueva Construcción y Renovaciones Importantes (LEED v4 for BD+C: New Construction and Major Renovation)

Checklist del proyecto

Nombre del proyecto:

Proyecto de Tesis

Fecha:

4/6/2018

13	0	0	Materiales y Recursos	13
Sí			Prerreq Almacenamiento y Recolección de Productos Reciclables	Obligatorio
Sí			Prerreq Planificación de la Gestión de los Desechos de Construcción y Demolición	Obligatorio
5		0	Crédito Reducción del Impacto del Ciclo de Vida del Edificio	5
2		0	Crédito Transparencia y Optimización de los Productos de Construcción - Declaración Ambiental de Productos	2
2		0	Crédito Transparencia y Optimización de los Productos de Construcción - Fuentes de Materias Primas	2
2		0	Crédito Transparencia y Optimización de los Productos de Construcción - Componentes de los Materiales	2
2		0	Crédito Gestión de los Desechos de Construcción y Demolición	2
5	0	1	Innovación	6
5		0	Crédito Innovación	5
0		1	Crédito Profesional Acreditado LEED	1
19	0	0	TOTALES	Puntos posibles: 110

Certificado: de 40 a 49 puntos, **Plata:** de 50 a 59 puntos, **Oro:** de 60 a 79 puntos, **Platino:** de 80 a 110

Tabla 22 Checklist LEED V4

3.4.2. Greenroads

Greenroads v2 Project Checklist

Project Name *
Proyecto de Titulación

City, State/Province, Country
Cuenca

Project Manager
Christopher Tapia

Project Budget (million USD)
10

Current Status
Planning

Target Score: Minimum
Project Requirements not met
Bronze Silver Gold Evergreen
Requirements: No

Email
Send a complete copy of this checklist to yourself.
Your email
christopher.tapia@ucuenca

SEND **Print**

Materials & Design	Attempting	My Score	Creativity & Effort	Attempting	My Score
MD-1 Preservation & Reuse 1-5 points	Y	5	CE-1 Educated Team 1-2 points		
MD-2 Recycled & Recovered Content 1-5 points	Y	5	CE-2 Innovative Ideas 1-5 points	Y	5
MD-3 Environmental Product Declarations 2 points	Y	2	CE-3 Enhanced Performance 1-5 points	Y	5
MD-4 Health Product Declarations 2 points	Y	2	CE-4 Local Values 1-3 points		
MD-5 Local Materials 1-5 points	Y	5			
MD-6 Long-Life Design 1-5 points					

Figura 15 Checklist on line Greenroads



Por medio del checklist on-line de Greenroads se pudo establecer que, para una nueva infraestructura vial de pavimento rígido, el uso de porcelana reciclada como agregado en el hormigón aporta con 29 puntos de los 40 mínimos requeridos para la obtención de una certificación Greenroads Bronce. El aporte viene dado de la sección Materiales y Diseño brindando 19 de los 24 puntos posibles, y de la sección Creatividad y Esfuerzo, aportando con 10 de 15 puntos posibles.

3.4.3. PaLATE V2.2

Los resultados obtenidos del análisis medioambiental mediante la herramienta calculadora para la producción de Hormicreto en el 2014 son:

- HORMIGÓN PATRÓN 100% G

Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site One-Way Only	
Unit	tons/CY	CY	tons	Distance (mi)	Mode
Gravilla 3/8"	2.09	12474.615	26071.945	10.0	Truck
Arena	2.22	15928.049	35360.269	10.0	Truck
Cemento HE	2.37	10080.697	23891.252	0.0	Truck
Viscocrete 4100	0.84	397.729	334.092	0.0	Truck
Porcelana 3/8"	2.20	0.000	0.000	0.0	Truck
Agua	0.76	7812.540	5937.530		Truck
Total: PCC to site	2.03		91595.089	0.0	Truck

Figura 16 Mezcla patrón para la producción del 2014 de Hormicreto

		Energy [GJ]	CO ₂ e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	150,712.0	21,696,644
	Materials Transportation	1,397.8	96,429
Total	Materials Production	150,712.0	21,696,644
	Materials Transportation	1,397.8	96,429
Total		152,109.7	21,793,074

Figura 17 Resultados del análisis medioambiental de la mezcla patrón

- HORMIGÓN 70% GRAVA – 30% PORCELANA

Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site One-Way Only	
Unit	tons/CY	CY	tons	Distance (mi)	Mode
Gravilla 3/8"	2.09	8732.231	18250.363	10.0	Truck
Arena	2.22	15475.128	34354.784	10.0	Truck
Cemento HE	2.37	10080.697	23891.252	0.0	Truck
Viscocrete 4100	0.84	397.729	334.092	0.0	Truck
Porcelana 3/8"	2.20	0.000	0.000	0.0	Truck
Agua	0.76	7812.540	5937.530		Truck
Total: PCC to site	2.03		82768.022	0.0	Truck

Figura 18 Mezcla 70%G-30%P para la producción del 2014 de Hormicreto



Universidad de Cuenca

		Energy [GJ]	CO ₂ e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	149,337.1	21,601,797
	Materials Transportation	1,196.9	82,574
Total	Materials Production	149,337.1	21,601,797
	Materials Transportation	1,196.9	82,574
Total		150,534.0	21,684,370

Figura 19 Resultados del análisis medioambiental de la mezcla 70%G-30%P

Como se puede observar existe una diferencia en consumo de energía entre el hormigón patrón y el óptimo de 1575.7 GJ, pero sin agregar el consumo energético de la trituradora usada. Conocido que la trituradora consume 3.7 kW y para obtener 85 kg de agregado grueso reciclado fue requerido del uso de la trituradora por 30 minutos, en este lapso se consumió 1.85 kWh.

Ahora en la mezcla con la combinación óptima se requiere triturar 7827583 kg para obtener todo el material necesario/usado en la producción de Hormicrete en el 2014, alcanzando un consumo de energía de 170362 kWh, equivalente a 613.3 GJ. Por lo que con esta incorporación del 30% de agregado reciclado se obtuvo un consumo total de 151147.3 GJ. Mientras que en la producción de emisiones de CO₂e se redujo 108704kg.

Este ahorro energético de 613.3 GJ equivale a la energía consumida en 24 horas por 120 000 focos de 60 watts. Y la disminución de las emisiones equivale a un recorrido de 100 km realizado por 15 000 buses.

- HORMIGÓN 100% PORCELANA

Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site One-Way Only		
Unit	tons/CY	CY	tons	Distance (mi)	Mode	
Gravilla 3/8"	2.09	0.000	0.000	10.0	Truck	▼
Arena	2.22	15475.128	34354.784	10.0	Truck	▼
Cemento HE	2.37	10080.697	23891.252	0.0	Truck	▼
Viscocrete 4100	0.84	397.729	334.092	0.0	Truck	▼
Porcelana 3/8"	2.20	0.000	0.000	0.0	Truck	▼
Agua	0.76	7812.540	5937.530		Truck	▼
Total: PCC to site	2.03		64517.659	0.0	Truck	▼

Figura 20 Mezcla 100%P para la producción del 2014 de Hormicrete

		Energy [GJ]	CO ₂ e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	146,494.6	21,405,694
	Materials Transportation	781.7	53,926
Total	Materials Production	146,494.6	21,405,694
	Materials Transportation	781.7	53,926
Total		147,276.2	21,459,620

Figura 21 Resultados del análisis medioambiental de la mezcla 100%P



Universidad de Cuenca

Una vez aprobado por comportamiento mecánico el reemplazo del 100% del agregado grueso mineral por la porcelana triturada en la elaboración de hormigones de altas prestaciones se pudo establecer una disminución del consumo de energía de 4833.5 GJ, pero sin agregar el consumo energético de la trituradora usada.

Ahora en la mezcla con 100% porcelana como agregado grueso se requiere triturar 26091943 kg para obtener todo el material necesario/usado en la producción de Hormicroto en el 2014, alcanzando un consumo de energía por el proceso de trituración de 567883.4 kWh, equivalente a 2044.4 GJ. Por lo que con esta incorporación del 100% de agregado reciclado se obtuvo un consumo total de energía de 149320.6 GJ. Mientras que en la producción de emisiones de CO₂ se redujo 333454 kg.

Este ahorro energético de 2789.1 GJ comparando la producción del hormigón patrón con el hormigón 100% porcelana, equivale a la energía consumida en 24 horas por 538 000 focos de 60 watts. Y la disminución de las emisiones equivale a un recorrido de 100 km realizado por 45 000 buses.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO

La caracterización del agregado mineral fino y grueso por medio del ensayo de granulometría permitió establecer el cumplimiento de la norma ASTM C33, útil para poder usar el método ACI 211 en el diseño de la mezcla de concreto.

En el caso del agregado mineral fino, este expuso características de módulo de finura de arena gruesa, satisfactorio para la elaboración de hormigones de alta resistencia. El agregado reciclado presenta densidad y absorción menor en comparación con el agregado grueso mineral, lo que nos dice que es un material más liviano, pero a la vez compacto e impermeable.

El ensayo de masa unitaria compacta combinando agregados mineral y reciclado, en diversos porcentajes, no produjo una combinación óptima que brinde una densidad máxima, útil para una menor necesidad de pasta para ligar los agregados, traduciéndose en menores costos. Este ensayo se usó como primer filtro para establecer la combinación de agregados óptima, pero ante su resultado no concluyente se procedió a determinar esta combinación óptima mediante varios diseños de mezclas.

4.2. DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS

La mezcla presento igual asentamiento con agregado mineral y agregado reciclado en todas sus combinaciones, incluyendo la mezcla con 100% agregado reciclado.

4.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA

En base a los ensayos a compresión y tracción indirecta realizados sobre los cilindros de hormigón, se pudo establecer que la combinación óptima de agregados es 70% Grava – 30% Porcelana. Esta combinación mostro mediante los dos ensayos, resultados similares a los obtenidos con el hormigón patrón.

En los ensayos a compresión realizados sobre los cilindros con 100% porcelana se obtuvieron en promedio una resistencia no menor en 184 kg/cm² con relación al hormigón patrón. Aquí se observó una disminución de la resistencia, pero el



hormigón no dejó de ser de alta resistencia, alcanzando 859 kg/cm² a los 28 días de curado. Por lo que se acepta la elaboración de hormigones de altas prestaciones con el reemplazo total del agregado mineral por el agregado reciclado.

La disminución de resistencia de los cilindros mientras más porcelana contiene, puede deberse principalmente a que una de las caras de la porcelana es lisa, es decir, no colabora en la adherencia del grano de agregado reciclado con la pasta.

Todos los cilindros ensayados con las diferentes combinaciones de agregados, incluyendo el 100% porcelana, presenta una resistencia a compresión mayor a 21 MPa, por lo que es capaz de comportarse como hormigón estructural.

Con el ensayo a tracción indirecta se pudo comprobar el buen comportamiento del hormigón alternativo de alta resistencia en sus diferentes combinaciones de agregado, ante este esfuerzo, con lo que se aprueba el uso del agregado reciclado para la elaboración de la losa de pavimento rígido, por su módulo de ruptura mayor a 35kg/cm².

4.5. SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL

Se estimó un beneficio de 18 puntos con el uso de la porcelana reciclada para la obtención de una certificación medioambiental LEED. Este beneficio representa el 45% del mínimo requerido, siendo un aporte considerable.

Para la evaluación sostenible de una infraestructura vial por medio de la herramienta online Greenroads, se pudo determinar que el uso de la porcelana en la elaboración de pavimento rígido aporta con 29 puntos de los 40 mínimos requeridos para una certificación.

Por medio de la producción de hormigón realizada por Hormicrete en el 2014, se determinó una reducción de contaminación de 21'793,074 a 21'684,370 kg CO₂e con el uso de la combinación de agregados óptima. Y una reducción de consumo energético de 152,109.7 a 151,147.3 GJ.

Establecido el comportamiento positivo del cilindro de hormigón ante los ensayos mecánicos con el 100% de porcelana, se propuso determinar su beneficio medioambiental, determinando una reducción de contaminación de 21793074 a



21459620 kg CO₂e. Y una reducción en el consumo de energía de 152109.7 a 149320.6 GJ.

REFERENCIAS

ACI 211. (1991). ACI 211.1, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy Weight and Mass Concrete.

Aguilar Sarmiento, E. E. (2015). Modelo de una planeación estratégica aplicada en la producción de pegantes y morteros en HORMICRETO CIA. LTDA.

Aïtcin, P. (2008). Concreto de Alto Desempeño, Ciencia y Tecnología. 1º.

ASTM. (2003). C09. ASTM C33-03, Standard Specification for Concrete Aggregates.

ASTM 1602, C. (2012). Standard Specification for Mixing Water Used in the Hydraulic Cement Concrete.

ASTM C150. (2012). Standard Specification for Portland Cement. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania.

ASTM C470. (2012). Standard Specifications for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically.

ASTM C496. (1996). Método de prueba estándar para determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral de especímenes cilíndricos de hormigón.

Astm, D. (2004). 422. *Standard test method for measurement of particle size analysis of soils*. ASTM, Philadelphia, Pennsylvania, USA.

Caram, J. (2012). El Impacto Ambiental de los Materiales de Construcción.

Ding, G., & Forsythe, P. J. (2013). Sustainable construction: life cycle energy analysis of construction on sloping sites for residential buildings. *Construction Management and Economics*, 31(3), 254-265.

GRAIMAN. (2017, diciembre 14). Criterios generales de la producción del desecho [Reunión].

Holcim Ecuador S.A. (2015). Holcim Premium. Cemento hidráulico Tipo HE de alta resistencia inicial.



- INECYC, J. C. (2009). Notas técnicas, control de calidad en el hormigón. *Control por resistencia Parte I). Ecuador-Quito.*
- INEN. (2010a). 856: Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino. *NTE.*
- INEN. (2010b). 857: Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso. *NTE.*
- INEN. (2010c). 858: Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos. *NTE.*
- INEN. (2010d). 1573: Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico. *NTE.*
- INEN. (2010e). 1576: Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo. *NTE.*
- INEN. (2010f). 1578: Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento. *NTE.*
- INEN. (2011a). 1108: Agua potable. Requisitos. *NTE.*
- INEN, N. (2011b). 2380 (2011) Cementos hidráulicos. *Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos. Instituto Ecuatoriano de Normalización. Quito, Ecuador Google Scholar.*
- Muench, S., Anderson, J., Hatfield, J., Koester, J., Söderlund, M., & Weiland, C. (2011). Greenroads Manual v1. 5. *Seattle, WA: University of Washington.*
- NEC. (2015). Estructuras de hormigón armado. *Código: NEC-SE-HM. Quito, Ecuador.*
- Niño Hernandez, J. (2010). *Tecnología de concreto* (Tercera Ed.). ASOCRETO.
- Paranese, S. H. K., & William, C. (2004). Diseño y Control de Mezclas de Concreto PCA.
- Portland Cement Association. (1984). Thickness design for concrete highway and street pavements. *Skokie, IL.*



Universidad de Cuenca

Portland Cement Association, Panarese, W. C., Bringas, M. S., & Kosmatka, S. H. (1992).

Diseño y control de mezclas de concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

Ramírez, A. (2002). La construcción sostenible. *Física y sociedad*, 13, 30-33.

Rodríguez, F., & Fernández, G. (2010). Ingeniería sostenible: nuevos objetivos en los proyectos de construcción. *Revista ingeniería de construcción*, 25(2), 147-160.

Sika Ecuatoriana S.A. (2015). Hoja Técnica de Producto Sika ViscoCrete 4100.

U.S. Green Building Council. (2018). LEED V4. Recuperado a partir de <https://new.usgbc.org/leed>

Vélez Guayasamín, A. S. (2013). Hormigones con escoria de acero de horno eléctrico: prestaciones mecánicas, físicas y químicas.